



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH
GESELLSCHAFT MIT BESCHRÄNKTER HAFTUNG
Zentrallabor für Chemische Analyse

**Bestimmung von Uran-232
und Folgeprodukten in bestrahlten
Uran-Thorium-Kernbrennstoffen**

von

Markus Stoeppler und Hermann Petri

Jül - 650 - CA
März 1970

Als Manuskript gedruckt



Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 650

Zentrallabor für Chemische Analyse Jül - 650 - CA

Dok.: Reactor Fuels - Spectrometry
 Reactor Fuels - Uranium Isotopes U-232
 Reactor Fuels - Uranium Isotopes U-233

DK: 621.039.54 : 535.853
 621.039.543.4

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH,
 Jülich, Bundesrepublik Deutschland

**Bestimmung von Uran-232
und Folgeprodukten in bestrahlten
Uran-Thorium-Kernbrennstoffen**

von

Markus Stoepler und Hermann Petri

INHALTSÜBERSICHT

	Seite
<u>Zusammenfassung</u>	1
1. <u>Einführung</u>	2
1.1 Übersicht	2
1.2 n,2n-Reaktionen	3
1.3 Bildung von ^{228}Th und Folgeprodukten aus ^{232}U	5
1.4 Analytisches	7
2. <u>Experimenteller Teil</u>	9
2.1 Meßanordnungen	9
2.1.1 Ge(Li)-Detektor	9
2.1.2 Si-Sperrschichtzähler	9
2.2 Präparationstechniken	10
3. <u>Ergebnisse</u>	11
3.1 Ge(Li)- γ -Spektren	11
3.2 α -Spektren	11
3.3 Zusammenfassung der Meßwerte, Diskussion	16
4. <u>Literaturangaben</u>	19

Zusammenfassung (Englisch und Deutsch)

(Determination of ^{232}U und its Daughters in Irradiated Uranium-Thorium Nuclear Fuels)

Aliquots from radiochemically separated and purified uranium fractions of solutions from irradiated nuclear fuels containing uranium and thorium have been measured with the aid of σ -spectrometry and α -spectrometry. Obtained values for the atomic ratios of ^{232}U to ^{233}U and of ^{232}U to the total uranium amounts are given.

Aliquots der radiochemisch abgetrennten und gereinigten Uranfraktionen von Lösungen bestrahlter Kernbrennstoffe, die Uran und Thorium enthalten, wurden σ -spektrometrisch und α -spektrometrisch gemessen; die dabei ermittelten ^{232}U zu ^{233}U - und ^{232}U zu Gesamturan-Atomverhältnisse werden mitgeteilt.

1. Einführung

1.1 Übersicht

^{232}Th wandelt sich in Brutreaktoren durch Einfang thermischer Neutronen in ^{233}Th um, das über ^{233}Pa in das spaltbare ^{233}U (Spaltquerschnitt 527.7 barn (1)) übergeht. Wegen der Möglichkeit von n,2n-Reaktionen mit schnellen Spaltneutronen, deren Schwellenenergie bei etwa 6 MeV liegt, wurde schon seit längerem die Bildung merklicher Anteile von ^{232}U aus ^{232}Th vorausgesagt und näherungsweise berechnet (2,3,4). ^{232}U ist ein Alphastrahler mit 71.7 Jahren Halbwertszeit. Sein thermischer Einfangquerschnitt beträgt 78, sein Spaltquerschnitt 77 barn (1); es reichert sich daher bei längeren Bestrahlungszeiten und merklichen Anteilen schneller Neutronen im entstehenden ^{233}U an. Diese Anreicherung muß bei der Herstellung von möglichst reinem ^{233}U und bei der Wiederaufarbeitung von Brüterbrennstoffen berücksichtigt werden.

Bei der Erzeugung von ^{233}U aus ^{232}Th ist es möglich, den unerwünschten ^{232}U -Anteil durch geeignete Bestrahlungstechniken (5,6) gering zu halten. Bei Brüterbrennstoffen muß jedoch mit erheblichen Anteilen des ^{232}U - vor allem bei wiederholtem Einsatz des erbrüteten ^{233}U - gerechnet werden.

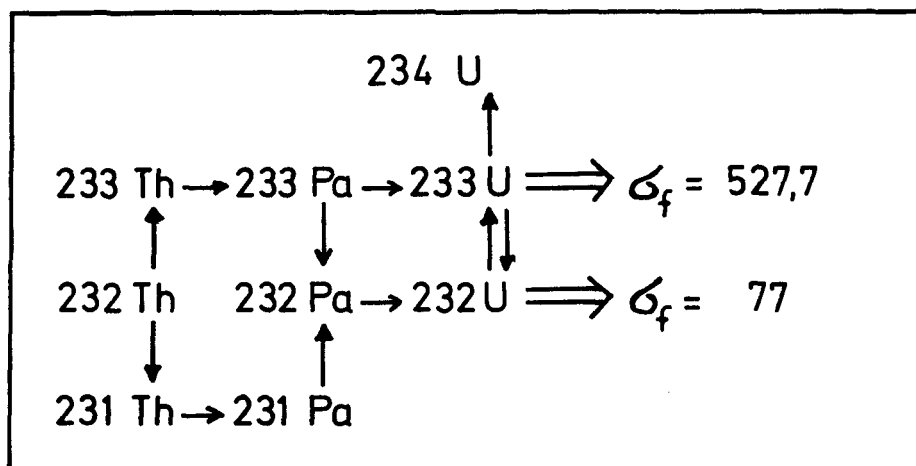
Auf die Möglichkeit, ^{232}U für Isotopenbatterien usw. zu erzeugen, sei ohne Diskussion der Details hingewiesen (7,8,9).

1.2 n,2n-Reaktionen

Zum Verständnis der Erzeugung von ^{232}U sind in Abb. 1 die wichtigsten, zu diesem Nuklid führenden Kernprozesse angeführt.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, daß aus ^{235}U - (n,2n-) - Reaktion des ^{237}Np zu ^{236}Np , das unter Emission eines Alphateilchens in ^{232}U übergeht, ebenfalls ^{232}U entstehen kann. Aus Messungen und Abschätzungen von ARNOLD (10) ergibt sich jedoch, daß bei $^{235}\text{U}/^{232}\text{Th}$ -Gemischen für Einzonenbrutreaktoren der über diesen Weg erzeugte ^{232}U -Anteil deutlich unter 1% des insgesamt gebildeten ^{232}U liegen dürfte.

Abb. 1 Übersicht über Kernreaktionen, die vom ^{232}Th zum ^{232}U führen



Erläuterungen:

\uparrow Neutroneneinfang \downarrow n,2n-Prozess
 \rightarrow β^- -Zerfall, \Rightarrow Spaltung

Wenn man ein Gemisch von ^{235}U und ^{232}Th als Ausgangsmaterial verwendet, wird vor allem der **n,2n-Prozess** am ^{232}Th den für den Aufbau des ^{232}U weitaus überwiegenden Beitrag leisten. Danach folgt hinsichtlich der Bedeutung für die ^{232}U -Produktion der **n,2n-Prozess** an ^{233}U und zuletzt der über ^{233}Pa führende Weg ($^{233}\text{Pa} (n,2n) \rightarrow ^{232}\text{Pa} \rightarrow ^{232}\text{U}$). Bei Zusatz des erbrüteten ^{233}U zum Thorium wird der Weg über die **n,2n-Reaktion** mit diesem Nuklid natürlich einen wesentlich höheren Beitrag liefern.

Die Wirkungsquerschnitte dieser **n,2n-Prozesse** waren zunächst aus statistischen Modellen für Kernreaktionen - die die Größenordnung mb erwarten ließen - abgeschätzt und zum Teil für die Ermittlung der zu erwartenden ^{232}U -Kontamination verwendet worden (2,3,4,11,12). Spätere Messungen, zuerst mit ^{232}Th (13) dann mit ^{233}U (14) lieferten experimentelle Werte, die mit den vorausberechneten recht gut übereinstimmten.

In Abhängigkeit vom jeweils eingesetzten Reaktortyp ergeben sich aus dem Produkt des energieabhängigen Wirkungsquerschnitts der (n,2n)-Reaktion und dem Neutronenfluß pro Energieintervall effektive Wirkungsquerschnitte, die aus den Daten des Reaktors berechnet werden können; die Möglichkeit zur experimentellen Überprüfung solcher Werte sollte aber stets genutzt werden.

Für Schwerwasserreaktoren mit Stabbündelelementen wurden - unter Zugrundelegung der bis dahin bekannten Werte - von SCHLOSSER und BEHRENS in ihrer ausführlichen Studie über den Aufbau von ^{232}U in Thoriumbrennstoffen (15) z.B. folgende effektiven (sog. Westcott-Querschnitte) errechnet:

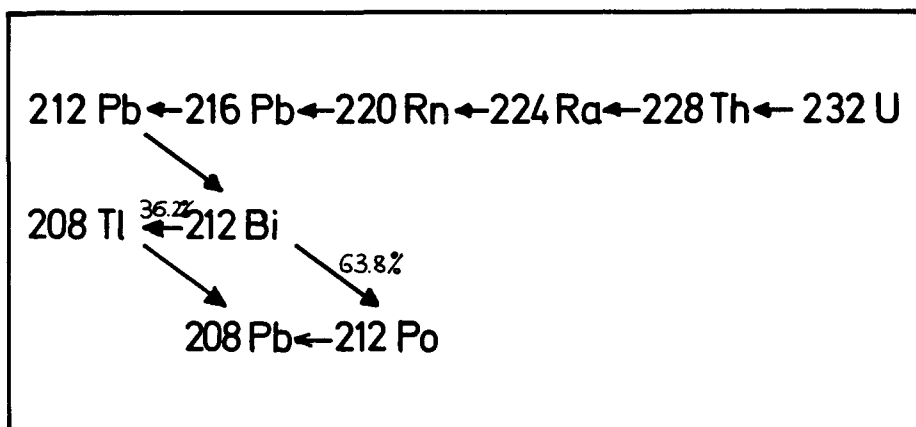
$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{\text{eff}} \text{ } ^{232}\text{Th} (n,2n) \text{ } ^{231}\text{Th} &= 7.4 \text{ mb} \\ \hat{\sigma}_{\text{eff}} \text{ } ^{233}\text{U} (n,2n) \text{ } ^{232}\text{U} &= 4.1 \text{ mb} \end{aligned}$$

Vorangegangen waren vor allem von ARNOLD (16) durchgeführte Untersuchungen über die Erzeugung von ^{232}U und ^{228}Th in Abhängigkeit vom Neutronenfluß und der Bestrahlungszeit nach einmaliger Bestrahlung. Die nach einem Algolprogramm ermittelten Daten von SCHLOSSER und BEHRENS (15) ergaben eine gute Übereinstimmung mit diesen Untersuchungen.

1.3 Bildung von ^{228}Th und Folgeprodukten aus ^{232}U

Der Alphazerfall des ^{232}U führt über ^{228}Th zum Aufbau sämtlicher auf dieses folgenden Radionuklide der natürlich radioaktiven Thorium (4n)-Familie mit, zum Teil sehr energiereichen Gammastrahlern, wie aus Abb. 2 und Tabelle 1 ersichtlich ist.

Abb. 2 Folgeprodukte von ^{232}U nach der Nuklidkarte (1)



Erläuterungen:

← Alphazerfall

↘ β^- -Zerfall

Tabelle 1 Die Daten der in Abb. 2 angeführten Radionuklide nach der Nuklidkarte (1) und der Table of Isotopes (17).

Nuklid	$T_{1/2}$	Strahlung	Energien (MeV) der wichtigsten Linien
^{228}Th	1.9 a	α	5,42; 5,34
^{224}Ra	3.64 d	γ	0,085; 0,22
^{220}Rn	55.6 s	α	5.68; 5,45
^{216}Po	0.15 s	γ	0.24
^{212}Po	0.3 μs	α	6,29
^{212}Bi	60.6 m	γ	0.55 (0.07 %)
		α 36,2 %	6.78
		γ	8.72
		α 36,2 %	6.05; 6.09
		γ	0.727; 0.040 1.620;
		β 63.89	0.785; 0.46
^{212}Pb	10.6 h	β^-	2.3
		γ	0.73; 0.04
^{208}Pb	stabil		0.239 (47%); 0.300 (3.26)
^{208}Tl	3.1 m	β^-	1,2
		γ	2,61; 0.58; 0.51

Das nach der Uran/Thorium-Trennung (z.B. bei der Wiederaufarbeitung) im Thorium befindliche ^{228}Th ist nach etwa 30 Tagen mit seinen Folgeprodukten im Gleichgewicht; danach klingt die Aktivität mit der Halbwertszeit des ^{228}Th von 1.9 Jahren ab (18).

In der Uranfraktion bildet sich aus dem ^{232}U das ^{228}Th nach. Zur Gleichgewichtseinstellung kommt es nach etwa 10 Jahren; dabei ist dann die Gesamt-Alpha-Aktivität des ^{232}U und seiner Folgeprodukte auf etwas mehr als das Fünffache der ursprünglich - nach der U/Th-Trennung - vorhandenen angewachsen.

Vor allem die Radionuklide ^{212}Bi und ^{208}Tl mit ihrer harten Gammastrahlung erfordern bei der Verarbeitung des Urans eine dem ^{232}U -Anteil und der jeweiligen Lagerzeit entsprechende Abschirmung. Berechnungsbeispiele für solche Fälle sind u.a. von STEWART und MACIS (19), von SCHLOSSER und BEHRENS (15), sowie von HERTZ (20) mitgeteilt worden.

1.4 Analytisches

In den letzten Jahren wurde eine Reihe von analytischen Methoden zur experimentellen Bestimmung von ^{232}U in ^{233}U und ^{235}U publiziert, bzw. Ergebnisse solcher Bestimmungen mitgeteilt (21, 22, 23, 24), die sich hauptsächlich auf massenspektrometrische, alpha- und gammaspektrometrische Messungen stützen. Die vorliegende Arbeit bringt eine Übersicht über nach solchen Methoden im Anschluß an die radiochemische Abtrennung des Urans aus thoriumhaltigen Kernbrennstoffen (25, 26) untersuchte Uranfraktionen aus Proben der AVR-Brennelemente und aus Bestrahlungsexperimenten im Rahmen des HTR- bzw. THTR-Programms.

Die Messungen ergaben in allen Fällen Uran-232 in merklicher Menge. Für die Dekontamination der Proben zur massenspektrometrischen Bestimmung des Uran-Isotopenverhältnisses folgt daher, daß es nutzlos ist, sehr hohe Dekontaminationsfaktoren für das Uran anzustreben, da die durch das Uran-232 induzierte Radioaktivität unausweichlich zu einem raschen Aktivitätsanstieg in der Uranfraktion nach der Abtrennung führt, der dem ^{232}U -Gehalt direkt proportional ist.

2. Experimenteller Teil

2.1 Meßanordnungen

Bei der Vorbereitung von Kernbrennstoffproben für die massenspektrometrische Bestimmung des Uran-Isotopenverhältnisses wurden die von den Spaltprodukten abgetrennten Uran- und Thoriumfraktionen γ - und α -spektrometrisch untersucht; im folgenden sind die hierfür verwendeten Anordnungen kurz beschrieben.

2.1.1 Ge(Li)-Detektor

Die γ -Spektren wurden mit einem Germanium-Detektor aufgenommen, dessen wichtigste Daten sind:

Aktives Zählvolumen ca. 30 cm^3

Ansprechwahrscheinlichkeit: 3 % im Vergleich zu einem 3X3' NaJ-Detektor (Co-60)

Auflösungsvermögen: 3 keV Halbwertsbreite bei 1.3 MeV

Die Aktivität der Proben war sehr niedrig, so waren meistens Meßzeiten von mehreren Stunden nötig. Dies hatte auch zur Folge, daß der Nulleffekt einen wesentlichen Bestandteil der Spektren bildete und wiederholt gemessen werden mußte. Die γ -Linien der Thoriumzerfallsreihe erscheinen daher ebenso im Untergrund wie als Folgeprodukte des ^{232}U .

2.1.2 Si-Sperrschichtzähler

Die α -Spektren wurden mit einem Si-Sperrschichtzähler in einer Vakuumkammer (10^{-4} Torr) aufgenommen. Der Detektor hatte eine Zählfläche von 2 cm^2 und ein Auflösungsvermögen von etwa 50 keV Halbwertsbreite für α -Teilchen mit einer Energie von 5 MeV (27).

2.2 Präparationstechniken

Bei der Alphaspektrometrie ist es wichtig, dünne und gleichförmige Präparate zu bekommen. Sehr gute Ergebnisse erzielt man dabei mit elektrochemischen Methoden (28, 29, 30) und mit speziellen Fällungstechniken (31, 32).

Bei unseren Untersuchungen, die zunächst lediglich den qualitativen Nachweis von ^{232}U in ^{233}U zum Ziel hatten, wurde jedoch eine einfachere Technik angewandt: Auf runde, mit Aceton und Salpetersäure gereinigte PVC-Plättchen von etwa 20-25 mm Durchmesser wurde die Uranlösung (5-10 μl mit 5-20 μg Uran) aufgetropft und mit einer oberflächenaktiven Substanz - z.B. n-Cetyl-Ammoniumbromid etc. - in geringen Mengen versetzt. Bei leichtem Verreiben mit der PÄ-Spitze der verwendeten Eppendorf-Mikropipette verteilt sich die Flüssigkeit auf 0.5 - 1 cm^2 ; die bei der Messung erhaltenen Peaks zeigen nur geringes tailing (vgl. die Abb. 4 u. 5). Später wurde durch Zusatz von etwa 1-2 μl Aceton zur schwach salpetersauren Uranlösung und anschließender Behandlung, wie oben beschrieben, eine so gleichmäßige und dünne Schicht erzielt, daß bei dem uns zur Verfügung stehenden Sperrschichtzähler das Spektrum der Probe (vgl. Abb. 6) praktisch symmetrische Peaks ergab.

Die Technik der Probenvorbereitung ist einfach und schnell durchführbar und es genügen im allgemeinen 5-10 μl der Uranlösung pro Präparat. Die Haltbarkeit der Proben dürfte ausreichend sein; eine Kontamination des Zählers wurde bisher nicht beobachtet; natürlich müssen die Präparate stets sorgfältig gehandhabt werden.

3. Ergebnisse

3.1 Ge (Li)- γ -Spektren

Nach der Dekontamination der Uranfraktion ergibt eine gammaspektrometrische Messung nicht selten nur den Nulleffekt. Sehr rasch wächst aber bei merklichen Uran-232-Anteilen das Thorium-228 mit seinen Folgeprodukten nach.

Ein für solche Proben typisches γ -Spektrum - 8 Wochen nach der Uranabtrennung gemessen - ist in Abb. 3 (S.12) gezeigt.

3.2 α -Spektren

Im allgemeinen wurden zur Bestimmung des ^{232}U - ^{233}U -Verhältnisses die Alphaspektren kurz nach der Uranabtrennung aufgenommen. In Abb. 4 (S.13) ist ein solches Spektrum abgebildet; der Anteil des ^{228}Th und seiner Folgeprodukte ist noch gering.

In Abb. 5 (S.14) ist das α -Spektrum der Thoriumfraktion den nach 2 Monaten nochmals radiochemisch gereinigten Probe B wiedergegeben.

Das α -Spektrum der behandelten Probe B 36 mit der Aceton-Präparationstechnik (Abb. 6, S. 15) zeigt die dabei erzielbare sehr gleichmäßige Verteilung. Ein Spektrum dieser Form ist für recht genaue Bestimmungen des ^{232}U zu ^{233}U - Verhältnisses durch Peakflächenintegration sehr gut geeignet.

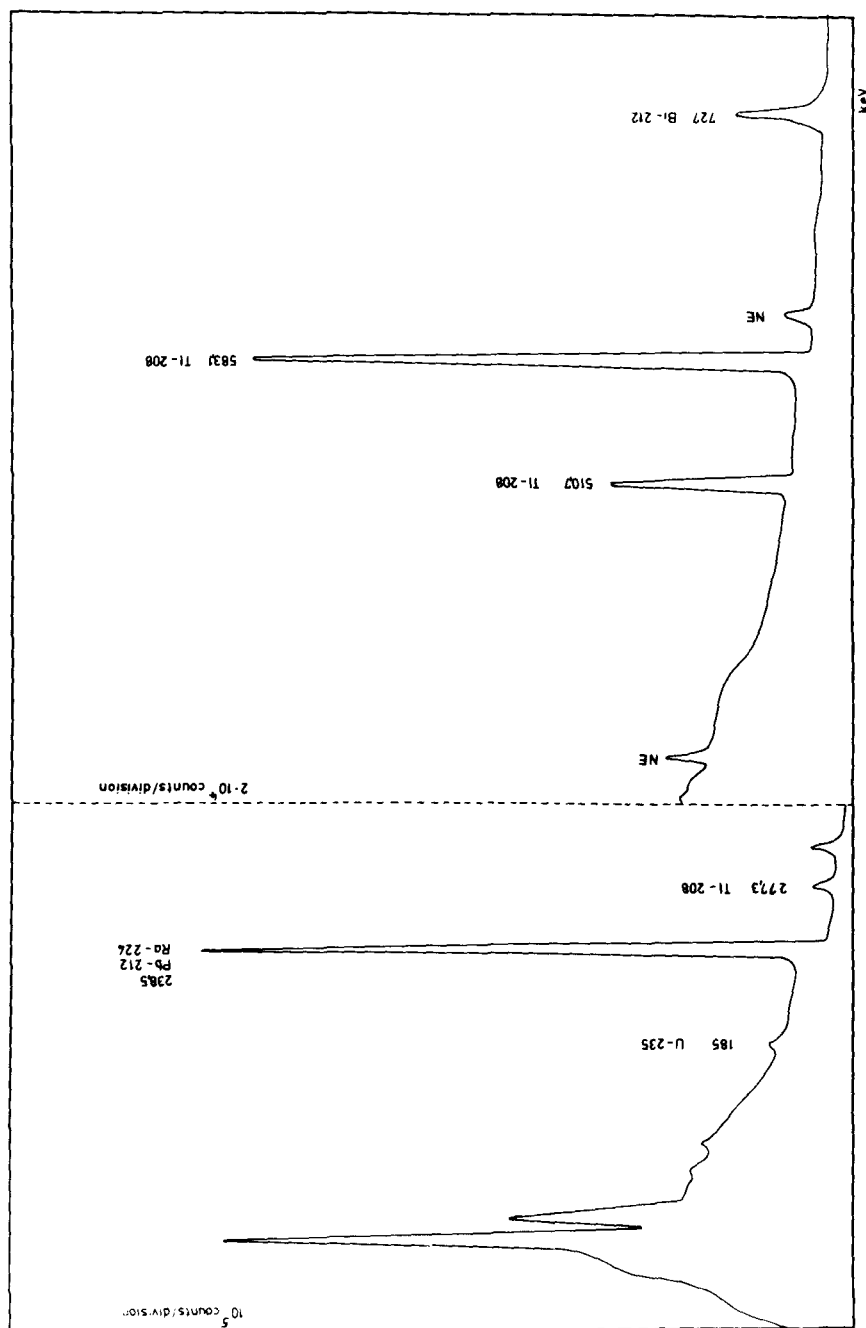


Abb. 3 α -Spektrum der Probe B 10, 8 Wochen nach Abtrennung der Uranfraktion

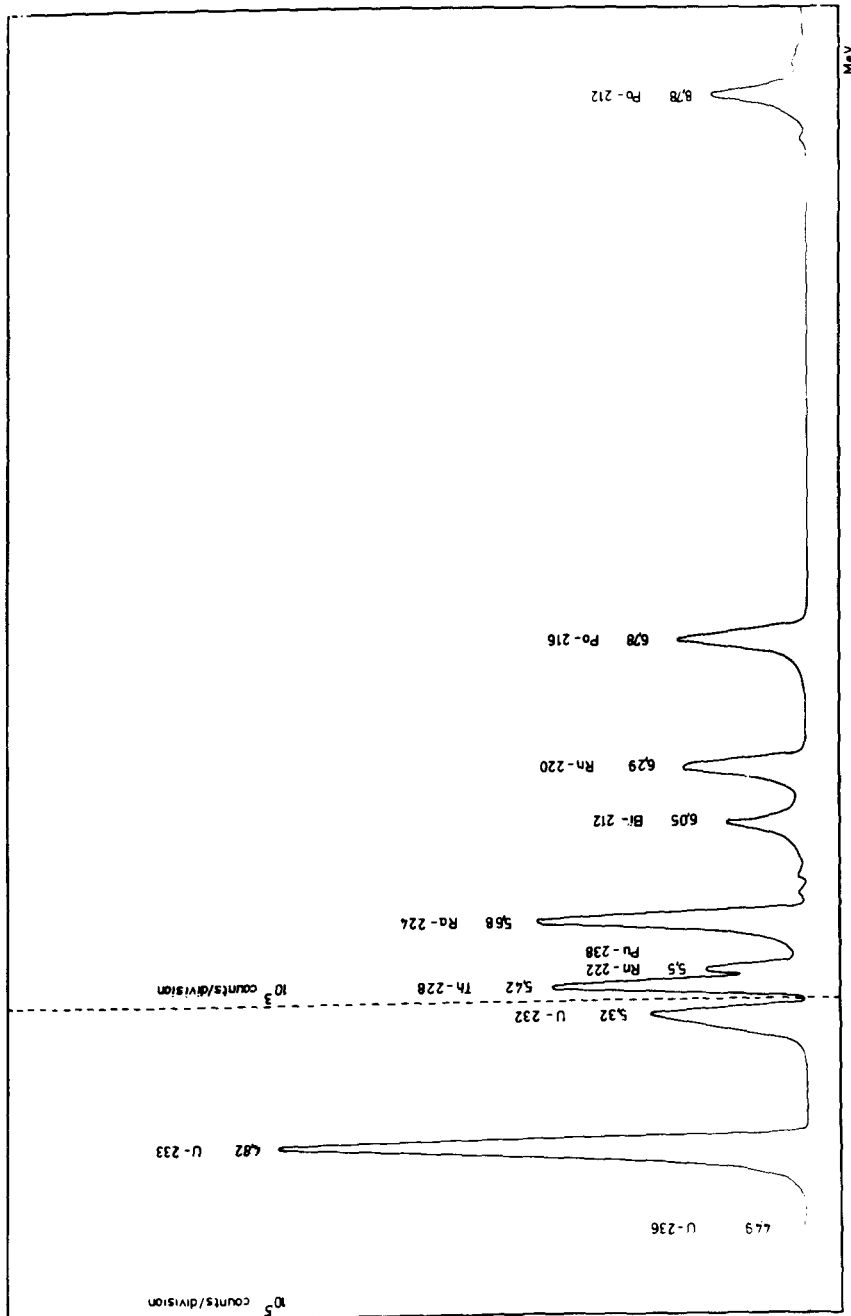


Abb. 4 α -Spektrum der Uranfraktion der Probe B 10, ca. 8 Tage nach Abtrennung des Urans vom Th und den Spaltprodukten

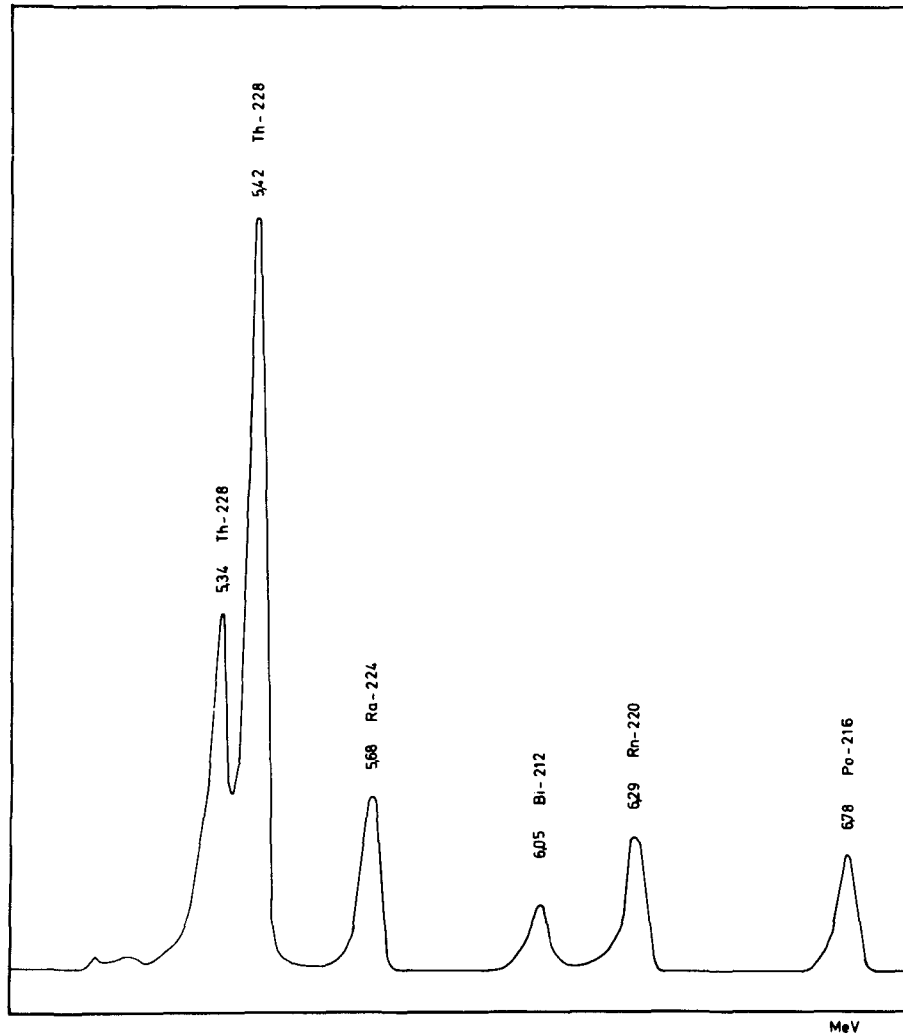


Abb. 5 α -Spektrum der Probe B 4; Thorium aus der Uranfraktion nach 8 Wochen Stehen abgetrennt.

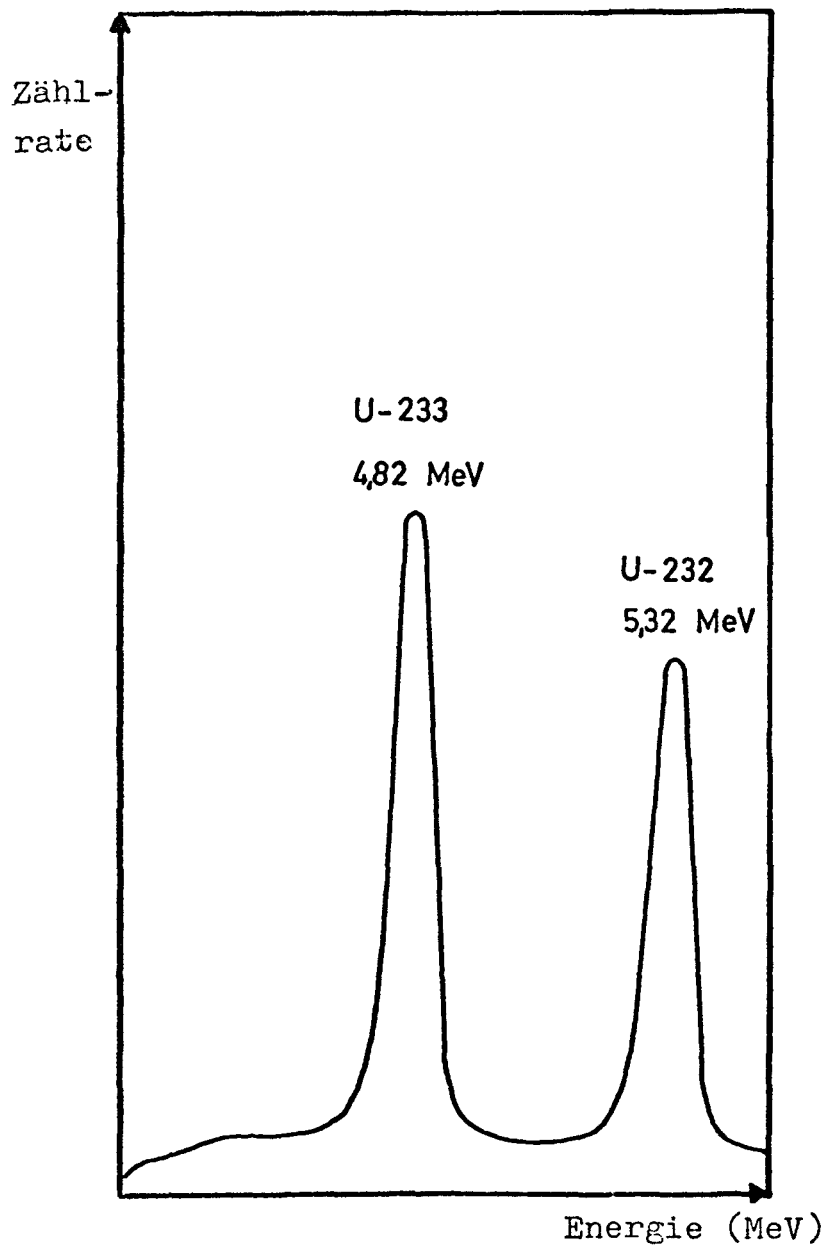


Abb. 6 α -Spektrum B 36, Meßzeit 10 min (Ausschnitt)

3.3 Zusammenfassung der Meßwerte, Diskussion

In Tabelle 2 (S. 17) sind die Ergebnisse der Messungen von 17 Proben aus Bestrahlungsexperimenten im Rahmen des THTR-Projekts und aus kugelförmigen Brennelementen des AVR-Reaktors zusammengestellt. Die Werte demonstrieren den zu erwartenden deutlichen Anstieg des ^{232}U -Anteils in der Uranfraktion mit steigendem Abbrand.

Die für die Berechnung der einzelnen Daten notwendigen Abbrandwerte und Isotopenverhältnisse stammen aus massenspektrometrischen Messungen im Institut für Reaktorwerkstoffe der Kernforschungsanlage Jülich (33).

Erläuterungen zu den unter Spalte 1 angegebenen Versuchsbezeichnungen finden sich im JAHRESBERICHT 1968 der KFA Jülich (34).

Eine zukünftige routinemäßige alphaspektrometrische Kontrolle des ^{232}U in Kernbrennstoffen ist z.B. im Anschluß an die Vorbereitung der Lösungen zur massenspektrometrischen Abbrandbestimmung ohne Schwierigkeiten möglich. Durch das optimierte Löseverfahren - das bereits bei den Proben 31, 36, 39 und 41 angewandt wurde - ist eine Kontamination an dieser Stelle praktisch ausgeschlossen.

Tabelle 2, Meßergebnisse

Bestr.-Ex- periment	ZCA- Nr.	Abbrand % fifa	Th/U- Verhältnis	Aktivitäts- verhältnis $\lambda_{233}/\lambda_{232}$	Atomzahlverhältnisse		$^{232}\text{U}/\text{Thorium (ca)}$
					$^{232}\text{U}/^{233}\text{U}$	$^{232}\text{U}/\text{Gesamt-Uran}$	
SN 2	B 6	15.5	0.53	9.14	0.49×10^{-4}	0.16×10^{-6}	0.24×10^{-6}
SN 7	B 7	23.9	0.51	7.28	0.61×10^{-4}	0.16×10^{-6}	0.25×10^{-6}
SP 4	B 8	46.1	4.63	1.46	3.05×10^{-4}	2.55×10^{-5}	0.30×10^{-5}
JP 3A	B 9	27.4	4.6	9.14	0.49×10^{-4}	0.38×10^{-5}	0.06×10^{-5}
JP 3A	B 10	23.3	4.5	2.76	1.64×10^{-4}	1.02×10^{-5}	0.18×10^{-5}
JP 3A	B 11	29.5	4.6	1.56	2.84×10^{-4}	2.35×10^{-5}	0.40×10^{-5}
JP 3A	B 12	27.9	nur Uran	121.2	0.037×10^{-4}	$< 10^{-7}$	
JP 5	B 13	25.2	5.03	3.64	1.22×10^{-4}	0.87×10^{-5}	0.012×10^{-5}
JP 5	B 14	23.0	4.95	2.74	1.62×10^{-4}	0.95×10^{-5}	0.015×10^{-5}
JP 5	B 15	23.0	4.93	3.35	1.33×10^{-4}	0.70×10^{-5}	0.010×10^{-5}
JP 5	B 16	25.2	4.94	3.17	1.40×10^{-4}	0.93×10^{-5}	0.015×10^{-5}
JP 6-2A	B 17	10.9	0.53	19.29	0.23×10^{-4}	0.07×10^{-6}	0.12×10^{-6}
JP 6-5A	B 18	12.1	0.53	13.10	0.34×10^{-4}	0.08×10^{-6}	0.14×10^{-6}
SK 1	B 31	46.7	unbekannt	1.44	3.1×10^{-4}	3.4×10^{-5}	-
SK 1	B 36	52.6	unbekannt	1.40	3.19×10^{-4}	4.3×10^{-5}	-
AVR 12	B 39	21.6	unbekannt	16.43	0.27×10^{-4}	0.08×10^{-5}	-
AVR 20	B 41	23.7	unbekannt	16.10	0.275×10^{-4}	0.09×10^{-5}	-

Bemerkungen zu Tabelle 2:

Bei den Proben 9-12 aus dem Experiment JP 3A schwanken die Werte unverhältnismäßig stark; eine Kontamination durch Uran-232 kann nicht ausgeschlossen werden, ebenso eine Beeinflussung durch Proben, die nur Uran-235 und kein Thorium enthielten. Vgl. hierzu den Hinweis auf das optimierte Löseverfahren auf S. 16.

4. LITERATURANGABEN

- (1) W. SEELMANN-EGGEBERT, G. PFENNIG und H. MÜNZEL
Nuklidkarte, 3. Auflage 1968, BMWF, Bonn
- (2) A.T. GRESKY and E.D. ARNOLD
Products Produced in Batch Neutron Irradiation of
Thorium, ORNL-1818, 1955
- (3) A.T. GRESKY and E.D. ARNOLD
Products Produced in Continuous Neutron Irradiation
of Thorium, ORNL-1817, 1956
- (4) Reactor Physics Constants
ANL-5800, 2nd Edition, 1963 p. 408 ff.
- (5) W.K. WOODS
The Preparation of clean ^{233}U
RL-SA-16, 1964, 9 p
- (6) R.H. MERKLE
Clean ^{233}U Production Methods and Parameters
Trans. Amer. Nucl. Soc. 8, 520, 1965
- (7) K.W. FOSTER
Radioisotopes for Heat Sources, I Calculation for
Preparation of ^{232}U by Irradiation of ^{230}Th and
 ^{232}Th
MLM-1182, 1963, 12 p
- (8) C.A. ROHRMANN
Values in Spent Fuel from Power Reactors
BNWL-25, 1965, 53 p
- (9) P. GUILLOT
Preliminary Study of the Preparation of ^{232}U by
Irradiation of ^{231}Pa
CEA-R-2517, 1965, 32p

- (10) E.D. ARNOLD
Formation of Plutonium-236 and Uranium-232 in
Slightly Enriched Power Reactors
Trans. Amer.Nucl. Soc. 9, 294, 1966
- (11) A.C. DOUGLAS
Neutron Cross Sections of ^{233}U in the Energy Range
4 to 15 MeV
AWRE-O-100, 1964
- (12) S. PEARLSTEIN
Analysis of (n,2n) Cross Sections for Medium and
Heavy Mass Nuclei
Nucl. Sci. Eng. 23, 238-250, 1965
- (13) R.A. HASSE, P. KAFALAS and R.R. HEINRICH
The Ratio of the (n, γ) to (n,2n) Cross Section
for Thorium-232 bombarded with Fission Neutrons
J. Nuclear Energy, 7, 205-09, 1958
- (14) J. HALPERIN, C.R. BALDOCK, L.E. IDOM, J.H. OLIVER
R.H. RAINEY
Measurements of the (n,2n) Cross Sections of ^{233}U ,
 ^{235}U and ^{237}Np
ORNL-4306, 1968 p. 1-2
- (15) G. SCHLOSSER und E. BEHRENS
Radioaktivität bestrahlter Thoriumbrennstoffe infolge
des Aufbaus von ^{232}U und ^{228}Th
Nukleonik, 9, 36-42, 1967
- (16) E.D. ARNOLD
Radiation Hazards of recycled ^{233}U -Thorium Fuels
Proc. of the Thorium Fuel Cycle Symposium Gatlin-
burg, 1962 TID-7650, I, 254-284
- (17) C.M. LEDERER, J.M. HOLLANDER, I. PERLMAN
Table of Isotopes, Sixth Edition, FIRST CORRECTED
PRINTING, MARCH 1968, JOHN WILEY & SONS, Inc.
- (18) F.E. OWEN
Recycled Thorium Doserates
HW-81933, 1964, 11p

- (19) D.C. STEWART, E.S. MACIAS, L.J. BASILE und J. MILSTED
Radioactivity Build-up in Freshly Separated ^{226}Ra ,
 ^{227}Ac and ^{232}U
Radiochimica Acta, 5, 237-38, 1966
- (20) M.R. HERTZ
Radiation Emitted by ^{233}U , ^{232}U Mixtures
MLM-1400, 1969, 23 p
- (21) R.C. SHANK et al
IDO-14636, 1964
- (22) ORNL-3750, 1965
- (23) M.R. WEILER; W.Y. MATSUMUTO
Determination of ^{232}U and ^{233}U in Irradiated Thorium
BNWL-159, Nov. 1965, 24 p
- (24) YANKEE CORE EVALUATION PROGRAM SEMI-ANNUAL
PROGRESS REPORT FOR THE PERIOD ENDING MARCH, 31, 1967
WCAP-6083, Aug. 1967
- (25) M. STOEPPPLER
Zur Abtrennung und Dekontamination von Uran aus
salpetersauren Spaltproduktlösungen mit Anionen-
austauschern
J. Radioanal. Chem., im Druck
- (26) M. STOEPPPLER
Apparative Anordnungen und Verfahren zur Vorbereitung
bestrahlter und unbestrahlter Kernbrennstoffproben
zur massenspektrometrischen Bestimmung des Uran-Iso-
topenverhältnisses
Ber. d. Kernforschungsanlage Jülich
Jül-633-CA, 1969, 51 S.
- (27) H. PETRI und G. RIEPE
Kernforschungsanlage Jülich, Institut für Reaktor-
bauelemente, unveröffentlichte Arbeiten

- (28) K.F. LAUER and V. VERDINGH
Preparation by Electro-Spraying of thin Uranium,
Plutonium and Boron Samples for Neutron Cross
Section Measurements in 4π - Geometry
Nucl. Instr. Meth. 21, 161-66, 1963
- (29) P.S. ROBINSON
The Production of Radioactive Sources by the
Electrospraying Method
Nucl. Instr. Meth., 40, 136-40, 1966
- (30) W. LITZOW
Alpha-spektrometrische Isotopen-Häufigkeitsanalyse
des Urans
Diss., Aachen, 1969, 96 S.
- (31) V.Z. MIHAILOVA and E.G. DEMENDJIEV
Preparation of large surface Uranium Dioxide Targets
Nucl. Instr. Meth., 66, 25-28, 1968
- (32) R. LIEBERMAN and A.A. MOGHISSI
Coprecipitation Technique for Alpha Spectroscopic
Determination of Uranium, Thorium and Plutonium
Health Physics, 15, 359-62, 1968
- (33) J. RAU
Kernforschungsanlage Jülich, Institut für Reaktor-
werkstoffe, private Mitteilung
- (34) KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH, JAHRESBERICHT 1968
S. 127

Wir danken Herrn Priv.-Doz. Dr. H.W. Nürnberg, Direktor
am Zentrallabor für Chemische Analyse für sein stetes
Interesse am Fortgang der Arbeit, Herrn Dr. G.Erdtmann
für anregende Diskussionen sowie den Herren Ing. grad.
St. Nicolai und A. Steffen für technische Hilfe.